ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(08):499-509.

Numerical and Experimental Study of Damage in Multi-Compartment Armor due to UNDEX

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Khodaeipour B.[1],
Khodarahmi H.[1],
SadeghYazdi M.[1*],
Ziya-Shamami M. [1]

How to cite this article
Khodaeipour M, Khodarahmi H, Noei N, SadeghYazdi M, Ziya-Shamami M, Numerical and Experimental Study of Damage in Multi-Compartment Armor due to UNDEX. Modares Mechanical Engineering; *2024;24(08):499-509.*

ABSTRACT

Multi-compartment structures are a sort of multi-layer armor widely used to protect naval equipment, due to their high resistance to underwater blasts, simple-tech/low-cost production, and repairability. The present article numerically investigates the contact UNDEX damages of conceptual-construction structures consisting of three metal layers and two mid-compartments. For this purpose, a set of experiments was designed and executed using AUTODYN. The numerical modeling process and outputs were validated with the results of an experimental test. The results showed that all the structures with the same mediums in compartments suffered rupture in their last layer. Structures with air-water mediums did not experience tearing in their last layer if had a St37 midplate. Benefiting from a St37 front plate led to a significant energy absorption increase of 62%. Also, all structures with water-air mediums had excellent resistance performances and presented a meaningful reduction of 49% in the last layer deflection providing a St37 midplate. Furthermore, the comparison of structural performances showed that the structure consisting of Al2024-T3, St37, and St37 layers respectively, and water-air mediums brings forward the most competitive altogether values for the minimum last layer's central deflection of 11.6 mm and maximum energy absorption per areal mass equal to 84.6 J.m^2/kg.

Keywords Multi-Compartment Structure, Contact UNDEX, Damage Characteristics, Parametric Study, Energy Absorption.

CITATION LINKS

1- Experimental study on the deformation and damage of cylindrical ... 2- Improving the performance of a multi-layer ... 3- Underwater Explosions. 4- Introduction to underwater explosion research. 5- Tłoczenie wybuchowe. 6- An integrated wave-effects model for an underwater ... 7- Deformation and fracture behaviour of plate ... 8- Damage characteristics of ship structures subjected ... 9- Pressure wave caused by trinitrotoluene (TNT) ... 10- Investigation of the shock wave propagation ... 11- Analysis of Stand Off and Charge ... 12- Investigation of an Stiffened Air-Backed Plate ... 13- Numerical study... 14- A numerical method for double-plated structure ... 15- Damage characteristics of coated cylindrical shells ... 16- Dynamic response of submerged steel cylinder ... 17- Microstructural damage and response of stiffened ... 18- Experimental and numerical studies on the response of ... 19- Experimental and numerical studies on the response of quadrangular ... 20- The influence of orientation of blast ... 21- Experimental and numerical investigation on the dynamic ... 22- Experimental study on the response of multi-layered ... 23- Change of specimen temperature during the ... 24- Repeated uniform blast loading on welded ... 25- . Mechanical behavior of materials. 26- Hydrocodes for structural response to underwater ... 27- The dynamic behaviors of a bubble ... 28- Experimental and numerical investigation on bubble ... 29- AUTODYN Explicit Software for Nonlinear Dynamics. 30- Blast resistance and multi-objective optimization ... 31- A constitutive model and data for metals ... 32- Fracture characteristics of three ... 33- Explicit finite-element analysis of ... 34- Impact of the boeing 767 aircraft into the world ... 35- Selection and analysis of material models ... 36- Determination of JWL parameters ... 37- Air blast validation using ANSYS/AUTODYN. 38- Thermodynamic and transport properties ... 39- Phenomenological model of shock ... 40- Properties of Explosives and Explosive ...

[1] Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

Correspondence
Address: Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

msadeghy@ihu.ac.ir

Article History
Received: August 10, 2024
Accepted: October 20, 2024
ePublished: November 17, 2024

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]

مطالعه عددی و تجربی آسیب در زره چندمحفظه‌ای ناشی از بارگذاری انفجاری زیرآب تماسی

بهروز خدائی‌پور[1]، حسین خدارحمی[1]، میلاد صادق یزدی[1]*، مجتبی ضیاء شمامی[1]

[1] دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده

سازه‌های چندمحفظه‌ای، دسته‌ای از زره‌های چندلایه هستند که به‌دلیل بازدهی مقاومتی بالا در برابر انفجارهای زیرآب، فناوری ساده و هزینه پایین ساخت و قابلیت تعمیرپذیری، به‌طور گسترده برای محافظت از تجهیزات دریایی استفاده می‌شوند. مقاله حاضر به مطالعه عددی آسیب ناشی از انفجار تماسی زیرآب در سازه‌هایی با ساختار مفهومی متشکل از سه لایه فلزی و دو محفظه مابین می‌پردازد و بهترین مولفه‌های ساختاری مادی را پیشنهاد می‌دهد. برای این منظور مجموعه آزمایش‌هایی طراحی و به‌کمک نرم‌افزار اتوداین شبیه‌سازی شدند. فرآیند مدل‌سازی عددی و خروجی‌های آن با نتایج یک آزمون تجربی اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که تمام ساختارهای با محیط‌های واسط مشابه هوا-هوا و آب-آب در محفظه‌ها دچار پارگی در لایه آخر شدند. ساختارهای با محیط‌واسط هوا-آب در صورت بهره‌گیری از لایه میانی از جنس St37، پارگی در لایه آخر را تجربه نمی‌کنند و یک افزایش جذب انرژی قابل‌توجه ۶۲ درصدی را مشروط به‌داشتن لایه جلو St37 نشان می‌دهند. همچنین ساختارهای با محیط‌های واسط آب-هوا بدون هرنوع پارگی در لایه آخر، همگی موفق عمل کرده و استفاده از لایه میانی St37 در آن‌ها منجر به کاهش ۴۹ درصدی خیز لایه آخر می‌شود. همچنین مقایسه عملکرد سازه‌ها نشان داد که سازه‌ای متشکل از لایه‌های به‌ترتیب Al2024-T3، St37 و St37 و محیط‌های واسط آب-هوا، هم‌زمان بهترین مقادیر را برای خیز حداقلی ۱۱/۶ میلی‌متری در لایه آخر و جذب انرژی ویژه سطحی حداکثری معادل با ۸۴/۶ ژول مترمربع بر کیلوگرم نتیجه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: زره چندمحفظه‌ای، انفجار زیرآب تماسی، آسیب، مطالعه پارامتریک، جذب انرژی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹
*نویسنده مسئول: msadeghy@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

امواج شاک ناشی از انفجار زیرآب یا آندکس (UNDEX) آسیب‌های جدی و خسارات جبران‌ناپذیری را به واحدهای شناور و سازه‌های غوطه‌ور در آب مانند کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و زیرساخت‌های نزدیک ساحل وارد می‌کند [1, 2]. مدل‌سازی تا حد ممکن دقیق این پدیده و ارزیابی پاسخ آندکس سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای در طراحی بدنه‌های محافظ دریایی نوین دارد. ساختارهای چندلایه ازجمله سازه‌های محافظ هستند که با بهره‌گیری از روش‌های کاهش امواج شاک انتقالی، مقاومت بالایی در برابر آسیب‌های اعمالی ایجاد می‌کند.

ابتدا در سال ۱۹۴۸ با تئوری کول [3] و سپس توسط محققین بسیاری [4-8]، توصیف‌های متفاوتی از امواج فشار حین فرایند آندکس مطرح گردید. تمامی این مدل‌های تجربی در شرایط انفجار میدان‌دور فرای محدوده‌ی حباب حاصل از انفجار زیرآب تخمین زده شده‌اند درحالی‌که در انفجارهای میدان‌نزدیک به‌سبب پیچیدگی‌های محاسباتی، پارامترهای انفجار با روش‌های آماری استحصال شده‌اند [9]. همچنین مطالعات تحلیلی قابل‌توجهی درخصوص رفتار انفجاری سازه‌ها انجام شده است؛ اما به‌سبب برهم‌کنش شدید و پیچیده امواج شاک و سیال-سازه (FSI) ناشی از هندسه، تغییرشکل‌های بزرگ سازه و مرز مواد متحرک با فرکانس بالا، ساده‌سازی‌هایی اجتناب‌ناپذیر بوده که خطای در نتایج را درپی داشته‌اند. ازاین‌جهت پیاده‌سازی روش‌های عددی در تخمین مشخصه‌های بارگذاری آندکس در خلال عبور از ساختارهای چندلایه، آسیب‌ها و بهینه‌سازی سازه‌ها، مفید بوده و مورداستفاده قرار گرفته است.

وانگ و همکاران [10] با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی کوپل‌شده (CEL) در نرم‌افزار اتوداین، انتشار امواج شاک و کاویتاسیون ناشی از آندکس در نزدیکی شرایط مرزی مختلف را بررسی کردند. آن‌ها با تمرکز بر اثرات حذف کاویتاسیون در اطراف سطوح آزاد، بیشینه فشارهای اعمالی و بازتابیده در نزدیکی صفحات هواپشت و آب‌پشت را مقایسه کردند. گله‌داری و خدارحمی [11] با هدف طراحی محفظه تست انفجار زیرآب، اثرات وزن و فاصله خرج بر بیشینه‌فشار سیال و تغییرفرم صفحه در زیرآب را به‌روش عددی مطالعه کردند. فضلی و کیاست [12] به مطالعه عددی پاسخ ورق تقویت‌شده هواپشت پرداختند. قارنگیان و محمدزاده [13] پاسخ زیردریایی S120 نیروی دریایی بریتانیا را تحت انفجار زیرآب به‌صورت عددی مطالعه کردند. لیو و همکاران [14] یک روش عددی را برای تحلیل انتشار آندکس از میان ساختار دولایه‌ای پر از آب توسعه دادند. آن‌ها با اعمال تقریب مجانبی مضاعف به بررسی اثرات FSI خارجی و با استفاده از المان‌های آکوستیک کاویتاسیون به ارزیابی اثرات FSI داخلی پرداختند. ژانگ و همکاران [15] به روش هیدرودینامیک ذرات هموار، اثرات پوشش پوسته استوانه‌ای بر آسیب‌های ناشی از آندکس تماسی را مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند برای حالت تک‌لایه، یک پوسته با پوشش داخلی به ضخامت مشابه و در موارد دولایه، یک پوسته بیرونی با پوشش بیرونی، محیط‌واسط آب و پوسته داخلی با پوشش داخلی بالاترین مقاومت در برابر شاک را نشان می‌دهد. مرادلو و والائی [16] به مطالعه جابجایی و کرنش در سازه‌های فولادی تقویت‌شده مستغرق تحت انفجار زیرآب پرداختند. منگ و همکاران [17] طی یک مطالعه عددی روی پوسته نیم‌کره‌ای دولایه تحت آندکس با استفاده از روش CEL در اتوداین نشان دادند که نوع محیط‌واسط

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]

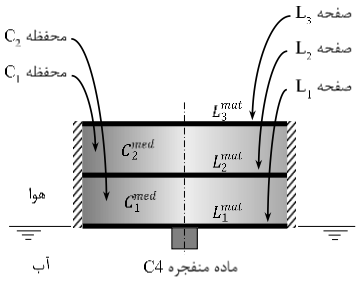
بین پوسته‌ها نقش مهمی در مشخصه‌های امواج شاک انتقالی و بازتابی دارد. تحقیقات مرتبط مفید دیگری [18-21] نیز در رابطه با پاسخ سازه‌های تحت بارگذاری انفجاری در دسترس هستند.

سازه‌های چندمحفظه‌ای ازجمله ساختارهای چندلایه متشکل از لایه‌های فلزی و محفظه‌های مابین هستند که استفاده وسیعی در صنایع دریایی دارند [14]. اگرچه تحقیقات زیادی بر روی صفحات ساده و تقویت‌شده در معرض آندکس صورت گرفته است اما رفتار این دسته از بدنه‌های محافظ به‌خصوص تحت آندکس تماسی کمتر موردمطالعه قرار گرفته است. درواقع ژانگ و همکاران [22] تنها کسانی بودند که به بررسی مکانیزم شکست در ساختار مشخصی از سازه‌های چندمحفظه‌ای تحت بارگذاری آندکس تماسی پرداختند. آن‌ها آزمایش‌های تجربی بر روی سازه چندمحفظه‌ای چهارلایه انجام دادند و نقش هر محفظه در جذب انرژی ناشی از وزن‌های مختلف مواد منفجره را ارزیابی کردند.

پژوهش حاضر به بررسی مدل ساختاری مفهومی متشکل از سه لایه فلزی دایره‌ای و دو محفظه استوانه‌ای مابین آن‌ها تحت آندکس تماسی می‌پردازد. طی یک مطالعه عددی پارامتریک، نقش محیط‌واسط هر محفظه و جنس لایه‌ها در آسیب‌های ساختاری و شاخص‌های متفاوتی از مقاومت به انفجار سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌های عددی به کمک نرم‌افزار اتوداین انجام و با مطالعه تجربی اعتبارسنجی شده است. انگیزه اصلی این کار پیشنهاد ساختار محافظی است که تحت آندکس تماسی، با وزن و ضخامت کل حداقلی، کمترین خیز لایه آخر و بیشترین جذب انرژی را نتیجه دهد.

۲- مدل ساختاری

مدل تحت مطالعه، مطابق با شکل ۱، ساختاری متشکل از سه لایه فلزی دایره‌ای L_1، L_2 و L_3 و دو محفظه استوانه‌ای C_1 و C_2 مابین آن‌ها دارد که به‌عنوان بخشی از بدنه‌ی محافظ غوطه‌ور سازه‌های دریایی، تحت آندکس تماسی قرار گرفته است. ازآنجاکه اندازه آسیب‌های ناشی از انفجارهای تماسی در بدنه سازه‌های بزرگ نسبت به کل سازه به‌صورت موضعی است، لذا لایه‌های فلزی و محفظه‌ها به‌صورت محیطی با شرایط مرزی کاملاً گیردار به یکدیگر متصل شده‌اند [22]. ضخامت صفحات فلزی و ارتفاع محفظه‌ها به‌ترتیب ۱/۵ و ۶۰ میلی‌متر است و همگی قطر ۲۰۰ میلی‌متر دارند. جنس لایه‌های فلزی به‌صورت L_1^{mat}، L_2^{mat} و L_3^{mat} و محیط‌واسط محفظه‌ها به‌صورت C_1^{med} و C_2^{med} به‌عنوان متغیرهای طراحی سازه در نظر گرفته شده‌اند. دو ورق آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 و فولاد St37 برای لایه‌های فلزی و دو محیط‌واسط هوا و آب برای محفظه‌ها لحاظ شده است. ماده منفجره نیز ۱۰ گرم C4 به‌شکل استوانه‌ای با نسبت طول به قطر ۱ و به‌صورت غوطه‌ور در آب به مرکز رویه جلویی L_1 متصل شده است.



شکل ۱) شماتیکی از مدل ساختاری تحت آندکس تماسی و پارامترهای آن.

ارائه یک سازه محافظ با بازده بالا و دامنه کاربرد وسیع نیازمند یک رویکرد طراحی جامع است. بر این اساس دو شاخص مقاومت انفجاری متفاوت و متعارض با یکدیگر به‌عنوان پاسخ سازه مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است که عبارت‌اند از: بیشینه خیز لایه آخر ($CentD$) و جذب انرژی ویژه سطحی ($EApM$). برای جلوگیری از انتقال اینرسی به اجسام محافظت‌شده، بیشینه خیز لایه آخر یک سازه محافظ همواره باید محدود شود که این امر با کاهش $CentD$ حاصل می‌شود. یک سازه محافظ کارا همچنین باید با کمترین وزن و ضخامت ممکن برای داشتن یک درگ حداقلی در آب، با استهلاک حداکثری انرژی انفجار، مانع از انتقال انرژی جنبشی به پشت سازه شود. لذا شاخص $EApM$ با تعریف نسبت جذب انرژی کل بر واحد جرم سطح سازه به‌گونه‌ای پایه‌ریزی شده تا با افزایش آن، تمامی موارد مطلوب به‌طور هم‌زمان محقق گردد.

۳- خواص مواد

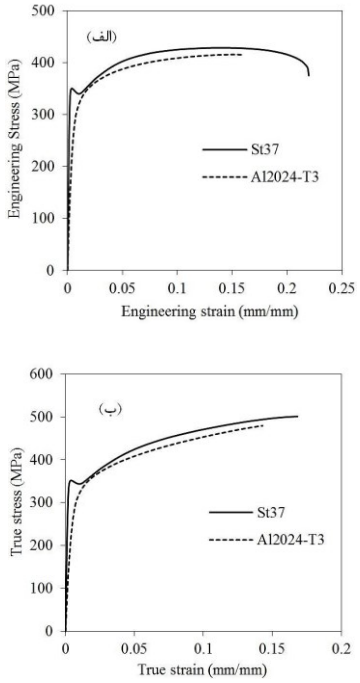
اگرچه ورق‌های Al2024-T3 و St37 تهیه‌شده برای لایه‌های فلزی استاندارد بودند اما برای اطمینان از فرآیند مدل‌سازی عددی و نتایج آن، خواص ورق‌ها مجدداً استخراج شده است. بدین منظور چندین آزمایش کششی شبه‌استاتیکی تک‌محوری با دستگاه تست سروهیدرولیک ۲۵ کیلونیوتن Instron/8800 انجام شد. نمونه‌های کششی مطابق با استاندارد ASTM: E-8M از ورق‌های Al2024-T3 به ضخامت ۱/۶ میلی‌متر و St37 به ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه شدند. با صرف‌نظر از ناهمسانگردی ناچیز کمتر از ۵٪ [23, 24]، تمامی نمونه‌ها با سه تکرار در جهت عمود بر راستای نورد ورق‌ها به‌کمک ماشین تخلیه‌الکتریکی وایرکات برش و با سمباده نرم صیقل داده شدند.

رفتار مهندسی میانگین حاصل از آزمون کشش نمونه‌ها در نرخ کرنش مشخص در شکل ۲-الف نشان داده شده است. نمودارهای تنش-کرنش حقیقی ($\sigma_{tr} - \varepsilon_{tr}$) نمونه‌ها نیز بر پایه نمودارهای مهندسی ($\sigma_E - \varepsilon_E$) و معادلات ۱ و ۲ استخراج گردیدند:

$$\sigma_{tr} = \sigma_E(1 + \varepsilon_E) \quad (۱)$$

$$\varepsilon_{tr} = ln(1 + \varepsilon_E) \quad (۲)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]



شکل ۲) نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های کششی Al2024-T3 و St37 در نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه الف) مهندسی و ب) حقیقی

حین آزمون کشش، تنش سه محوری پیچیده‌ای در ناحیه گلویی نمونه‌ها اتفاق می‌افتد که منجر به اعتبار معادلات فوق و منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی تنها تا پیش از آغاز گلویی‌شدن می‌شود [25]. با تجزیه‌وتحلیل رفتار نمونه‌ها در شکل ۲-ب، خواص مکانیکی ورق‌های Al2024-T3 و St37 محاسبه و در جدول ۱ داده شده است.

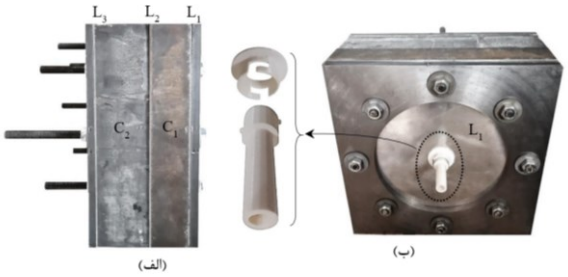
جدول ۱) خواص مکانیکی ورق‌های مورداستفاده در نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه

پارامتر	نماد	واحد	Al2024-T3		St37	
			میانگین	انحراف-معیار	میانگین	انحراف‌معیار
چگالی	ρ	kg/m³	۲۷۰۰	–	۷۸۵۰	–
ضریب پواسون	v	–	۰/۲۹	–	۰/۳	–
مدول الاستیک	E	GPa	۷۳	۲/۱	۲۰۰	۵/۷
تنش تسلیم	σ_y	MPa	۲۶۵	۷/۴	۳۵۰	۹/۹
استحکام کشش نهایی	σ_u	MPa	۴۱۵/۵	۱۱/۷۵	۴۲۸/۶	۱۲/۲
تنش شکست	σ_f	MPa	۴۱۴/۲	۱۱/۷	۳۸۸/۴	۱۰/۸
کرنش شکست	ε_f	–	۰/۱۶۱	۰/۰۰۴	۰/۲۲	۰/۰۰۶

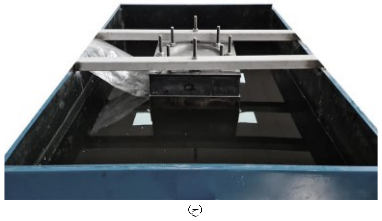
۴- تست تجربی

ازآنجایی‌که انجام تست‌های تجربی انفجار بسیار حادثه‌ساز، پرهزینه و نیازمند تجهیزات خاص هستند لذا آزمایش‌های طراحی‌شده به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده‌اند. چنین رویکردی مستلزم اعتبارسنجی دقیق مدل‌سازی عددی و امکان‌سنجی روش CEL در اتوداین است. بر این اساس، طی یک مطالعه تجربی، تست آزمایشگاهی طرح‌ریزی و انجام شد و نتایج آن برای صحه‌سنجی داده‌های خروجی هیدروکد مورد استفاده قرار گرفت.

راه‌اندازی آزمایش تجربی در دو مرحله مجزا صورت گرفت. ابتدا لایه‌های فلزی و محفظه‌های مابین مونتاژ شد که نماهای جانبی و روبرو همراه با مجموعه بارگذاری به‌ترتیب در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب قابل مشاهده است. سپس مجموعه مونتاژی مطابق با شکل ۳-ج بر روی حوضچه آب نصب گردید. با توجه به ورق‌های استاندارد دردسترس، برای L_1، ورق Al2024-T3 باضخامت ۱/۶ میلی‌متر و برای لایه‌های L_2 و L_3، ورق St37 باضخامت ۲ میلی‌متر لحاظ شده است. این ورق‌ها طول و عرض۳۰۰ میلی‌متری دارند. دو محفظه C_1 و C_2 نیز مکعب‌هایی به طول و عرض ۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت‌های ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر از فولاد ۴۳۴۰ هستند که استوانه-های متحدالمرکزی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر در مرکز آن‌ها تراشکاری شده است. محیط‌واسط هر دو محفظه در تست تجربی، هوا در نظر گرفته شده است. ماده منفجره C4 به‌جرم ۱۰ گرم به‌شکل استوانه‌ای با قطر و طول برابر است. جهت اعمال بارگذاری، یک مکانیسم نر و مادگی به‌صورت قالبی از خرج و چاشنی، مطابق با قسمت بزرگنمایی‌شده در شکل ۳-ب، طراحی و با چاپگر سه‌بعدی ساخته شد. چنین سازوکاری از جابجایی احتمالی C4 حین پرکردن حوضچه آب، انفجار ناموفق ناشی از رطوبت خرج و خطرات انفجار ناگهانی جلوگیری می‌کرد. ازاین‌رو ابتدا قسمت مادگی در مرکز روی جلوی L_1 مهار شد و سپس قسمت نری همراه با خرج و چاشنی جاسازی‌شده در آن، داخل یک کیسه پلاستیکی قرار گرفت و به قسمت مادگی متصل شد. سر دیگر کابل چاشنی نیز به نانلی در فاصله ۲۰ متر متصل شد.



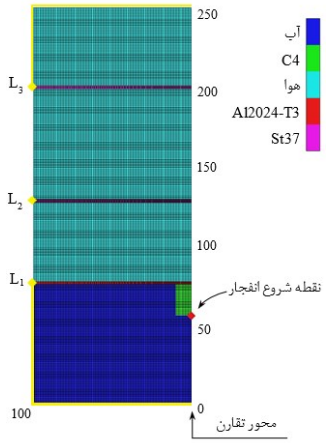
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]



شکل ۳) نمای الف) جانبی و ب) روبروی سازه و (ج) قرارگیری مونتاژ سازه و مجموعه بارگذاری زیر آن بر روی حوضچه آب.

۵- شبیه‌سازی عددی

مایر [۲۶] توانایی هیدروکدهای لاگرانژی، اویلری، CEL و لاگرانژی-اویلری دلخواه (ALE) در حل مسائل FSI را باهم مقایسه کرد. بر این اساس روش لاگرانژی در تعیین تنش، کرنش و تغییرشکل در شرایطی که سازه تغییرشکل‌های بزرگ و نرخ کرنش بالایی را تجربه نکند، موفق عمل می‌کند؛ اما در صورت اعوجاج شدید المان‌ها، دترمینان ماتریس ژاکوبین در نقاط گوسی منفی شده و گام زمانی برای پایداری حل کوچک و محاسبات متوقف خواهد شد. در همین حال، روش اویلری می‌تواند با مشکلات ناشی از تغییرشکل‌های بزرگ و سیلان مقابله کند، اما قادر به تشخیص دقیق مرز مواد نیست. از سوی دیگر، رویکرد CEL که در این مطالعه نیز به‌کار گرفته‌شده، از مزیت‌های هر دو روش اویلری و لاگرانژی در حل مسائل با FSI پیچیده [27, 28] و اعوجاج شدید المان بهره می‌گیرد. با توجه به تقارن سازه، شرایط مرزی و بارگذاری، برای شبیه‌سازی فرآیند انفجار زیرآب تماسی روی سازه چندمحفظه‌ای، یک مدل عددی متقارن محوری دوبعدی مطابق با شکل ٤ ایجاد و از هیدروکد اتوداین نسخه R21.1 [29] برای تحلیل آن استفاده شد. فضای اویلری، مستطیلی به‌ابعاد ۱۰۰×۲۵۰ میلی‌متر است که ۷۵ میلی‌متر از آن با آب، به‌عنوان محیط‌واسط نامحدود دریا و ماده منفجره C4 مستطیلی به‌ابعاد ۲۰×۱۰ میلی‌متر پرشده است. نقطه انفجار در مختصات ۵۵ میلی‌متر بر روی محور تقارن با لوزی قرمز نشان داده شده است. محیط‌واسط محفظه‌ها بسته به شرایط آزمایش، با هوا یا آب پر شده‌اند و پشت L_3 به‌عنوان یک فضای تحت حفاظت با هوا پرشده است. شرایط مرزی جریان خروجی (Flow_Out) در دو سمت ادامه‌دار محیط‌واسط دریا و هوای پشت سازه اعمال شده است که با خطوط ضخیم زردرنگ مشخص می-باشد. یک حساسیت به مش بر روی فضای اویلری با اندازه المان-های یکنواخت مربعی به طول ۵، ۲/۵، ۱ و ۰/۵ میلی‌متر صورت گرفت. بررسی پایداری بیشینه فشار موج شاک در فواصل مختلف، منجر به اتخاذ اندازه مش ۱ میلی‌متر شد که نتایج آن با خطای قابل‌اغماضی نسبت به مش‌های ۰/۵ میلی‌متر، مزایای محاسباتی به‌مراتب بیشتری را شامل می‌شد.



شکل ۴) مدل عددی فضای مسئله همراه با شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی

لایه جلویی L_1 به شعاع ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت و جنس تعیین-شده در هر آزمایش، به‌صورت یک قطعه لاگرانژی در مختصات ۷۵ میلی‌متری محور تقارن ایجاد شده است. لایه‌های فلزی L_2 و L_3 نیز بسته به ضخامت و جنس و ارتفاع محفظه‌های تعیین‌شده در آزمایش در فواصل مشخص نسبت به L_1 مدل شده‌اند. شرایط مرزی کاملاً گیردار در حاشیه پیرامونی ورق‌ها اعمال و با لوزی‌های زرد نشان داده شده است. به‌طور مشابه، اصلاح مشی در قطعات لاگرانژی با اندازه المان‌های ۲، ۱، ۰/۸ و ۰/۲۵ میلی‌متر درجهت ضخامت و بر اساس همگرایی پاسخ‌های $CentD$ و $EApM$ انجام شد. نتایج مطالعه حساسیت به‌مش نشان داد که قطعات لاگرانژی با تعداد ۱۵۰ المان در جهت شعاعی شامل ۴۰ المان به‌طول ۰/۵ میلی‌متر از سمت مرکز ورق‌ها و ۱۱۰ المان که اندازه آن‌ها به‌تدریج تا مرز ورق‌ها کشیده می‌شود و همچنین یک المان به ازای هر ۰/۵ میلی‌متر در راستای ضخامت، ازنظر دقت خروجی و هزینه‌های محاسباتی بهترین عملکرد را دارد.

مدل رفتاری هر یک از مواد در فضای مسئله شامل Al2024-T3، St37، آب، هوا و C4 و پارامترهای موردنیاز در تحلیل هیدروکد اتوداین در پیوست آ به‌تفکیک بیان شده است.

۶- طراحی آزمایش

۱ در این مرحله باهدف دستیابی به بهترین ساختار محافظ، مطالعه پارامتریکی بر روی مؤلفه‌های مادی سازه صورت گرفته است. برای این منظور، مجموعه آزمایش‌هایی با جایگشت تمام حالت‌های ممکن برای جنس لایه‌های فلزی L_1^{mat}، L_2^{mat} و L_3^{mat} و محیط-واسط‌های C_1^{med} و C_2^{med} محفظه‌ها طراحی شده است. پارامترها و نتایج حاصل از شبیه‌سازی هریک از آزمایش‌ها در جدول ۲ بیان شده است. دیگر شرایط حاکم بر آزمایش‌ها مطابق با شرایط پیش-فرض بخش ۲ است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]

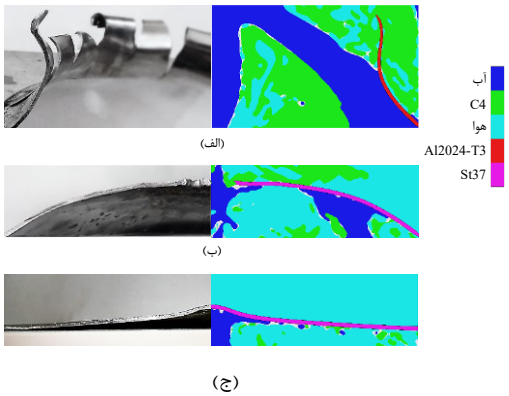
جدول ۲) آزمایش‌های طراحی‌شده برای پارامترهای مادی سازه

شماره آزمایش	پارامترهای مادی سازه					پاسخ	
	L_1^{mat}	L_2^{mat}	L_3^{mat}	C_1^{med}	C_2^{med}	$CentD$ (mm)	$EApM$ (J.m²/kg)
۱	Al2024-T3	Al2024-T3	St37	هوا	آب	۳۱/۹	۸۱/۷
۲	Al2024-T3	St37	Al2024-T3	آب	هوا	۱۳/۸	۹۲/۵
۳	St37	Al2024-T3	Al2024-T3	آب	هوا	۳۷/۱	۸۳/۲
۴	St37	St37	Al2024-T3	آب	آب	–	–
۵	Al2024-T3	St37	St37	هوا	هوا	–	–
۶	Al2024-T3	St37	Al2024-T3	آب	آب	–	–
۷	Al2024-T3	St37	St37	آب	آب	–	–
۸	Al2024-T3	Al2024-T3	Al2024-T3	هوا	هوا	–	–
۹	Al2024-T3	Al2024-T3	St37	آب	آب	–	–
۱۰	Al2024-T3	Al2024-T3	St37	آب	هوا	۳۰/۵	۷۹/۳
۱۱	Al2024-T3	Al2024-T3	Al2024-T3	هوا	آب	–	–
۱۲	St37	Al2024-T3	Al2024-T3	آب	آب	–	–
۱۳	St37	St37	Al2024-T3	هوا	هوا	–	–
۱۴	St37	St37	Al2024-T3	آب	هوا	۱۲/۵	۸۴/۶
۱۵	Al2024-T3	Al2024-T3	Al2024-T3	آب	آب	–	–
۱۶	St37	Al2024-T3	Al2024-T3	هوا	هوا	–	–
۱۷	St37	Al2024-T3	St37	آب	هوا	۳۰/۷	۷۷/۹
۱۸	St37	St37	Al2024-T3	هوا	آب	۴۰/۷	۱۶۴
۱۹	St37	Al2024-T3	Al2024-T3	هوا	آب	–	–
۲۰	St37	St37	St37	آب	هوا	۱۰/۹	۷۸
۲۱	Al2024-T3	St37	St37	هوا	آب	۲۷	۶۷/۱
۲۲	St37	Al2024-T3	St37	آب	آب	–	–
۲۳	St37	St37	St37	هوا	هوا	–	–
۲۴	St37	Al2024-T3	St37	هوا	هوا	–	–
۲۵	Al2024-T3	Al2024-T3	Al2024-T3	آب	هوا	۳۶/۳	۸۵/۶
۲۶	St37	St37	St37	هوا	آب	۳۳/۳	۱۵۰/۱
۲۷	Al2024-T3	St37	Al2024-T3	هوا	هوا	–	–
۲۸	Al2024-T3	Al2024-T3	St37	هوا	هوا	–	–
۲۹	St37	Al2024-T3	St37	هوا	آب	–	–
۳۰	St37	St37	St37	آب	آب	–	–
۳۱	Al2024-T3	St37	Al2024-T3	هوا	آب	۳۲/۴	۷۴/۹
۳۲	Al2024-T3	St37	St37	آب	هوا	۱۱/۶	۸۴/۶

۷- نتایج و بحث

۷-۱- اعتبارسنجی

نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی بعد از ۲ میلی‌ثانیه از شروع انفجار که پایداری قابل قبولی در پاسخ سازه را نشان می‌دهد، مطابق با شکل ۵ مقایسه شده است. مطابق با شکل ۵-الف، L_1 به‌طور کامل پاره و گلبرگ‌های مختلفی در آن به‌وجود آمده است. حفره ایجادشده قطر متوسطی در حدود ۱۵۸ میلی‌متر و گلبرگ جلوتر در تصویر ارتفاع ۴۸/۲ میلی‌متر دارد. شکاف ایجادشده در شبیه‌سازی عددی با ۲/۵٪ اختلاف، قطر ۱۶۲ میلی‌متر دارد و گلبرگ قرمزرنگ با ارتفاع ۴۶/۴ میلی‌متر خطای ۳/۷٪ را نشان می‌دهد. همچنین مطابق با نمای جانبی L_2 در شکل ۵-ب، این لایه یک تغییر شکل پلاستیک بزرگ همراه با شکاف دایره‌ای مرکزی را تجربه کرده است. قطر قسمت پانچ‌شده در آزمایش تجربی حدود ۲۴/۵ میلی‌متر و در شبیه‌سازی عددی ۲۴ میلی‌متر برآورد شده که اختلاف ۲٪ را نشان می‌دهد. به سبب تراکم خوردگی‌های موضعی نزدیک حفره پانچ‌شده ناشی از برخورد محصولات انفجار و تکه‌های L_1، خیز L_2 در فاصله ۲۰ میلی‌متر از محور تقارن اندازه‌گیری شده، به‌طوری‌که نتایج تست تجربی و عددی به‌ترتیب ۲۳/۱ و ۲۳/۸ میلی‌متر را با ۳٪ اختلاف به‌دست می‌دهند. لایه آخر نیز، مطابق با شکل ۵-ج یک تغییرشکل نرم و کمی شدیدتر در مرکز را تجربه می‌کند. بیشینه‌خیز مرکزی ایجادشده در L_3 طی آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی با ۴٪ انحراف به‌ترتیب ۱۰/۰۳ و ۱۰/۴۴ میلی‌متر به‌دست آمد.



شکل ۵) مقایسه نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی برای لایه الف) L_1، ب) L_2 و ج) L_3 سازه

شباهت زیاد الگوهای آسیب در سازه چندمحفظه‌ای تحت انفجار زیرآب تماسی حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، حتی در لایه جلویی L_1 که علی‌رغم پیچیدگی‌های فیزیکی بارگذاری شدید موضعی، خطاهای قابل‌اغماضی را نشان می‌دهد، صحت فرآیند مدل‌سازی عددی را به‌خوبی تائید می‌کند.

۷-۲- آسیب‌شناسی

پس از اطمینان از فرآیند مدل‌سازی عددی و خروجی‌ها، مجموعه ۳۲ آزمایش با شرایط مختلفی از پارامترهای مادی تحت آندکس تماسی شبیه‌سازی و نتایج آن‌های پس از گذشت ۲ میلی‌ثانیه از شروع انفجار استخراج شد. یک بررسی کلی، نشان می‌دهد که لایه L_1 ساختارها که در تماس با خرج C4 قرار دارد دچار پارگی شده و گلبرگی‌های متفاوتی را تجربه می‌کند. اما در مورد لایه‌های L_2 و L_3 ساختارها نمی‌توان الگوی واماندگی مشترکی را فارغ از دیگر مولفه‌های مادی ارائه کرد. لذا در تلاش برای آسیب‌شناسی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]

ساختارهای تحت آزمایش در جدول ۲ و مطالعه عوامل اثرگذار، پاسخ ساختارها براساس نوع محیط‌واسط محفظه‌ها به‌تفکیک بررسی می‌شود.

شایان ذکر است، چرایی رفتار انفجاری سازه‌های چندلایه با بررسی اختلاف امپدانس لایه‌ها قابل توجیه است. زمانی‌که موج شاکی وارد ساختاری دولایه با ناپیوستگی مادی می‌شود، بسته به خواص فیزیکی نسبی دو محیط، بخشی از موج وارد محیط دوم و بخشی منعکس می‌گردد. تنش ناشی از جبهه موج شاک ورودی برابرست با:

$$\sigma_I = -\rho_1 c_1 v_I \quad (۳)$$

که در آن v_I سرعت ذرات موج ورودی و ρ_1، c_1 به‌ترتیب چگالی و سرعت موج محیط اول و به‌صورت $c_1 = \sqrt{E_1/\rho_1}$ با مدول الاستیسیته محیط در ارتباطند. تنش جبهه امواج انعکاسی و انتقالی به‌فرم زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_R = -\rho_1 c_1 v_R \quad (۴)$$

$$\sigma_T = -\rho_2 c_2 v_T \quad (۵)$$

که ρ_2، c_2 چگالی و سرعت موج محیط دوم و v_R و v_T به‌ترتیب سرعت ذرات امواج انعکاسی و انتقالی هستند. پیوستگی تنش و سرعت ذرات در سطح مشترک نتیجه می‌دهد:

$$\sigma_I + \sigma_R = \sigma_T \quad (۶)$$

$$v_I + v_R = v_T \quad (۷)$$

با اعمال روابط ۳، ۴ و ۵ در معادلات ۶ و ۷، تنش جبهه امواج انعکاسی و انتقالی به‌دست می‌آید:

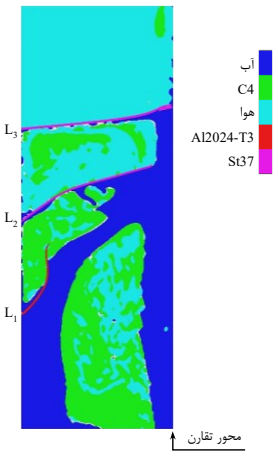
$$\sigma_R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\sigma_I \quad (۸)$$

$$\sigma_T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\sigma_I \quad (۹)$$

درصورتی‌که موج تنش از محیطی با امپدانس (ρc) بالا به محیطی با امپدانس پایین برخورد کند، بخش اندکی از آن وارد محیط دوم و عمده آن به‌صورت یک موج کششی منعکس و سبب افزایش هرچه‌بیشتر سرعت ذرات محیط اول می‌شود. در مقابل درشرایطی‌که $\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$ باشد، موج به‌مراتب قوی‌تری وارد محیط دوم می‌شود.

۷-۲-۱ ساختارهای با محیط‌های واسط هوا-هوا

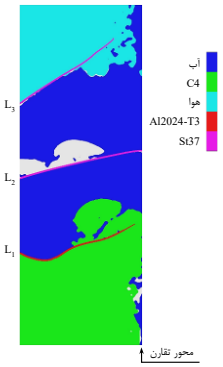
تمام سازه‌هایی که در دو محفظه هوا دارند دچار پارگی در لایه آخر شده‌اند. استفاده صرف از هوا به‌عنوان یک محیط‌واسط با امپدانس پایین اگرچه میرایی بیشینه‌فشار موج شاک را تسریع می‌کند اما باعث می‌شود تا انتشار بارگذاری موضعی شدید روی L1 در حد فاصل کوتاه ضخامت سازه‌ها به‌صورت یک موج شاک متمرکز ادامه یابد. چنین ساختاری همچنین به‌دلیل نداشتن یک محیط‌واسط چگال، قادر به جذب انرژی جنبشی محصولات انفجار و تکه‌های جداشده از لایه‌های مختلف روی لایه‌های بعد نخواهد بود. لایه L1 این ساختارها، مطابق با نمونه نوعی شکل ۶، گلبرگی‌های با ارتفاع بلند و حفره قطور در مرکز را متحمل می‌شود. لایه‌های میانی L2 نیز به‌اتفاق، یک پانچ‌شدگی مرکزی در همان لحظات ابتدایی و یک خیز نه‌چندان نرم را در ادامه تجربه می‌کنند. متعاقبا لایه آخر در این ساختارها به‌سبب اینرسی بالای ناشی از برخورد تکه پانچ-شده متحمل تغییرشکل موضعی شدید و ایجاد حفره در مرکز شده-اند.



شکل ۶) پاسخ ساختار نوعی با C_1^{med} و C_2^{med} هوا

۷-۲-۲- ساختارهای با محیط‌های واسط آب-آب

هر هشت سازه با محیط واسط آب در محفظه‌ها دچار الگوهای پارگی مشابه با شکل ۷ در لایه آخر شده‌اند. وجود محیط‌واسط با امپدانس بالا در بین لایه‌های فلزی سبب گردیده تا بخش عمده جبهه موج شاک از لایه‌ها و محفظه‌های سازه عبور کند و با تغییر از حالت موضعی شدید به حالت گسترده، به‌سرعت به لایه L3 برسد. چنین فرآیندی همچنین باعث شده تا ارتفاع گلبرگی‌های ایجادشده در L1 کوتاه باشد، انرژی جنبشی محصولات انفجار و تکه‌های ورق L1 به L2 منتقل نشود و خیز ایجادشده در لایه میانی نرم و نسبتا کم باشد. علاوه‌براین از آنجایی‌که هوای پشت لایه آخر، امپدانس بسیار پایینی دارد، لذا بخش بزرگی از موج شاک اعمالی بر L3 بازتاب پیدا می‌کند. موج بازتابی اگرچه تنش فشاری در راستای ضخامت L3 را کم می‌کند، اما با تسریع سرعت لایه آخر به‌سمت بیرون باعث افزایش شدید تنش‌های غشایی و نهایتا پارگی در آن می‌شود.

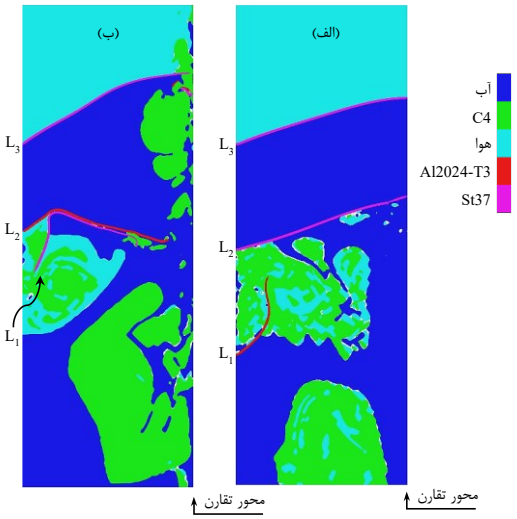


شکل ۷) پاسخ ساختار نوعی با C_1^{med} و C_2^{med} آب

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]

۷-۲-۳- ساختارهای با محیط‌های واسط هوا-آب

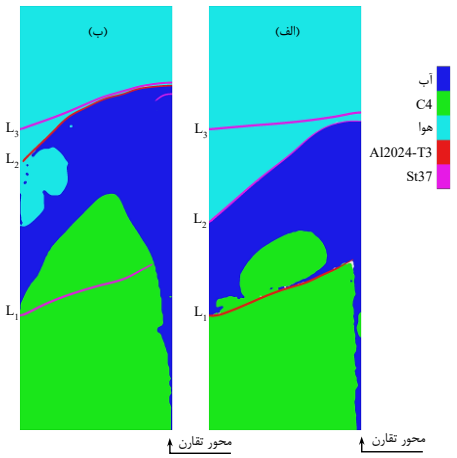
رفتار سازه‌های با محفظه‌های C_1 و C_2 به‌ترتیب پرشده از هوا و آب، اثرپذیری بیشتری را نسبت به جنس و چیدمان لایه‌های فلزی نشان می‌دهد. در یک نگاه کلی، این ساختارها با لایه میانی St37 موفق عمل کرده و با لایه میانی Al2024-T3، جز در یک مورد (ساختار شماره ۱)، پارگی در لایه آخر را تجربه کرده‌اند. ترکیب دو محیط‌واسط با امپدانس‌های پایین و بالا به‌ترتیب در C_1 و C_2 اگرچه باعث عبور بخش زیادی از موج شاک متمرکز اعمالی روی L_2 شده اما تنها ورق St37 به‌سبب چقرمگی بالا و ضرایب شکست تعریف‌شده توانسته در برابر پانچ‌شدگی مرکزی مقاومت کند. این در حالی است که در مرکز لایه‌های میانی از جنس Al2024-T3 پانچ‌شدگی دایره‌ای رخ داده که با برخورد به لایه L_3 باعث ایجاد حفره در مرکز آن شده است. الگوهای رفتاری نشان داده‌شده در شکل‌های ۸-الف و ب مؤید این موضوع است. پارامتر اثرگذار کلیدی دیگر بر شاخص‌های انفجاری $CentD$ و $EApM$ سازه، جنس لایه L_1 است که در تماس مستقیم با خرج انفجاری، انرژی متمرکز بسیار زیادی را دریافت می‌کند. در صورت بهره‌گیری از Al2024-T3، شعاع زیادی از ورق در همان ابتدا به‌سرعت از بین می‌رود و حالت موضعی شدید بارگذاری تا حدود زیادی تعدیل می‌شود و بیشینه‌خیز لایه را نیز کاهش می‌یابد. این موضوع در ساختار شماره ۱ نیز دیده می‌شود. در مقابل اگر از St37 در لایه جلویی استفاده شود، تنها بخش مرکزی نزدیک به شعاع خرج انفجاری پانچ می‌شود و باتحمل تغییرشکل‌های شدید باعث افزایش معنادار جذب انرژی، کمک به روند تمرکز انتشار موج شاک و نهایتاً افزایش بیشینه خیز لایه آخر می‌شود.



شکل ۸) پاسخ ساختارهای نوعی با C_1^{med} هوا، C_2^{med} آب و لایه میانی الف) St37 و ب) Al2024-T3

۷-۲-۴- ساختارهای با محیط‌های واسط آب-هوا

سازه‌هایی که در محفظه‌های C_1 و C_2 به‌ترتیب آب و هوا دارند بدون هر نوع پارگی در لایه آخر، پتانسیل مقاومت به انفجار زیرآب بالایی را از خود نشان داده‌اند. درواقع چنین ترکیبی از محیط‌های واسط با امپدانس بالا و پایین در محفظه‌های جلو و عقب سبب می‌گردد تا بارگذاری موضعی روی L_1، فارغ از جنس لایه جلو، در همان ابتدا به‌شکل یک موج شاک با جبهه گسترده بر روی L_2 اعمال شود و بخش اعظم آن از همان‌جا بازتاب پیدا کند. محیط‌واسط چگال C_1 درگ قابل‌توجهی را نیز بر محصولات انفجاری و تکه‌های جداشده از L_1 وارد می‌کند و با جلوگیری از پانچ‌شدگی مرکز لایه میانی باعث می‌شود تا L_2 نقش یک سپر کارآمد در انسداد امواج شاک انتقالی به لایه آخر را بازی کند. بر همین اساس رفتار این دسته از سازه‌ها و شاخص‌های انفجاری اندازه‌گیری‌شده تأثیرپذیری بالایی از نوع ورق مورداستفاده در لایه میانی را نشان داده است. ورق St37 با چقرمگی و انرژی شکست بالایی که دارد یک خیز بزرگ گنبدی‌شکل مشابه با الگوی ارائه‌شده در شکل ۹-الف را متحمل می‌شود که باعث کاهش قابل‌توجه بیشینه‌خیز لایه آخر و افزایش نسبی جذب انرژی شده است. درحالی‌که لایه میانی Al2024-T3 بعد از یک خیز بشقابی‌شکل، مطابق با شکل ۹-ب، از لبه‌ها گسیخته شده و با برخورد به لایه آخر منجر به یک تغییرشکل بزرگ و یکنواخت‌تر در آن شده است.



شکل ۹) پاسخ ساختارهای نوعی با C_1^{med} آب، C_2^{med} هوا و لایه میانی الف) St37 و ب) Al2024-T3

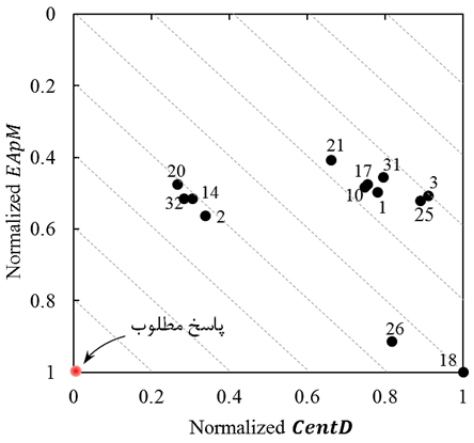
۷-۳- مقایسه عملکرد ساختارهای موفق

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد پژوهش حاضر به دنبال ارائه ساختار بهینه‌ای است که دامنه کاربرد محافظتی وسیعی داشته باشد. ازاین‌رو در جدول ۲ برای ساختارهایی که حین بارگذاری انفجاری زیرآب تماسی دچار پارگی در لایه آخر شده‌اند، پاسخی گزارش نشده است. درواقع سازه‌های با هر نشانه‌ای از پارگی در آخرین لایه داخلی عملاً نمی‌توانند به‌عنوان زره دریایی به‌خصوص برای

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]

تانکرهای غوطه‌ور استفاده شوند و در محدوده اهداف تحقیقاتی مطلوب قرار ندارند.

برای ارزیابی عملکرد سازه‌هایی از جدول ۲ که در برابر انفجار زیرآب تماسی موفق بوده‌اند، نمودار پارتو-فرانت [30] شکل ۱۰، شاخص‌های $CentD$ و $EApM$ نرمال‌شده ساختارها را مقایسه می‌کند. ساختارهای شماره ۱۸ و ۲۶ در عین جذب انرژی بالا، خیز قابل‌توجهی را نیز متحمل شده‌اند. درحال‌که ساختارهای ۲، ۱۴، ۲۰ و ۳۲ با یک خیز لایه آخر کم، قابلیت جذب انرژی کمتری را نشان داده‌اند. درواقع افزایش $EApM$ منجر به افزایش نامطلوب $CentD$ و کاهش $CentD$، کاهش ناخواسته $EApM$ را سبب شده است. چنین تعارضی در خروجی‌های سازه محافظ اهمیت مطالعه پارامترهای ساختاری طراحی دررسیدن به یک عملکرد مطلوب را به‌خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۱۰) نمودار پارتو-فرانت $CentD$ و $EApM$ نرمال‌شده برای ساختارهای موفق از جدول ۲

هدف‌گیری تنها یکی از دو شاخص مقاومت به انفجار، ساختار شماره ۲۰ با $CentD$ معادل با ۱۰/۹ میلی‌متر را به‌عنوان سازه با کمترین خیز در لایه آخر و ساختار شماره ۱۸ با $EApM$ برابر با ۱۶۴ ژول مترمربع بر کیلوگرم را به‌عنوان سازه با بیشتر قابلیت جذب انرژی در واحد جرم سطح معرفی می‌کند. در همین حال به دنبال یک سوگیری دو هدفه جهت دستیابی هم‌زمان به $CentD$ حداقلی و $EApM$ بیشینه، با فرض ضرایب وزنی (اهمیت) یکسان برای هر دو شاخص، برای ساختارها یک تابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌شود که می‌بایست مینیمم گردد:

$$f\left(L_1^{mat}, L_2^{mat}, L_3^{mat}, C_1^{med}, C_2^{med}\right) = Normalized\ CentD - Normalized\ EApM \quad (۱۰)$$

بر این اساس خط‌چین‌های اریب در شکل ۱۰، معیاری برای ساختارهای با مقادیر تابع هدف یکسان هستند به‌طوری‌که هر چه خط اریب موازی گذرا از پاسخ یک ساختار در شکل ۱۰ به نقطه قرمزرنگ نزدیک‌تر باشد درواقع مجموع عملکرد مقاومت به انفجار بهتری دارد. ازاین‌رو ساختارهای ۲، ۱۴، ۲۰ و ۳۲ با بهره‌گیری از مزیت‌های محفظه‌های به‌ترتیب پرشده از آب و هوا و لایه میانی St37، که در بخش ۷-۲-۴ به‌تفصیل بیان شد، عملکرد برتر محسوسی داشته‌اند. در این میان ساختار ۳۲ با یک لایه جلو Al2024-T3 سبک‌تر و لایه آخر St37 با استحکام بالاتر مجموعاً کمترین خیز لایه آخر ۱۱/۶ میلی‌متری و بیشترین جذب انرژی ویژه سطحی معادل با ۸۴/۶ ژول مترمربع بر کیلوگرم را نتیجه داده است. در مقابل ساختار ۳ با محیط‌های واسط آب-هوا، لایه جلو St37 و لایه‌های میانی و آخر Al2024-T3 با خیز لایه آخر ۳۷/۱ میلی‌متر و جذب انرژی ویژه سطحی ۸۳/۲ ژول مترمربع بر کیلوگرم، در مجموع بدترین عملکرد مقاومت به انفجار را در بین سازه‌های موفق داشته است.

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد ساختار مفهومی چندمحفظه‌ای تحت انفجار زیرآب تماسی به کمک نرم‌افزار اتوداین موردمطالعه قرار گرفت. ابتدا خواص مواد ورق‌های فلزی با انجام آزمون‌های کششی تک‌محوری شبه‌استاتیک تعیین و سپس مدل‌سازی عددی با یک آزمون تجربی اعتبارسنجی شد. در ادامه دو شاخص انفجاری برای سازه تعریف شد و طی یک مطالعه پارامتریک، اثر مؤلفه‌های مادی ساختاری بر پاسخ سازه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آسیب‌شناسی ساختارهای تحت آزمایش نشان می‌دهد که نوع محیط‌های‌واسط‌محفظه‌ها نقش تعیین‌کننده در الگوی رفتاری سازه‌ها دارد. بر این اساس:

- سازه‌های با محیط‌های‌واسط مشابه در دو محفظه، فارغ از جنس لایه‌های فلزی، همگی در لایه آخر دچار پارگی شده‌اند. بهره‌گیری صرف از هوا در عین افزایش سرعت میرایی جبهه موج شاک به‌طور نامطلوبی باعث تمرکز انتشار بارگذاری در طول ضخامت سازه، پانچ‌شدگی در مرکز لایه میانی و پارگی متعاقب در لایه آخر شده است. در مقابل، استفاده از آب در دو محفظه اگرچه انرژی جنبشی محصولات انفجار و تکه‌های ورق‌ها را مستهلک می‌کند اما هم‌زمان باعث تسهیل انتقال موج شاک در طول سازه، بازتاب موج از لایه آخر، تسریع سرعت، افزایش شدید نیروهای غشایی و نهایتاً پارگی در آن شده است.
- سازه‌های با محیط‌های واسط متفاوت اثرپذیری بیشتری را نسبت به جنس لایه‌های فلزی نشان داده‌اند. ساختارهای با محیط‌واسط هوا-آب و لایه میانی Al2024-T3، پانچ‌شدگی دایره‌ای در L_2 و پارگی در L_3 را متحمل شده‌اند درحالی‌که با لایه میانی St37 موفق عمل کرده‌اند. بهره‌گیری از یک ورق فولادی مشابه در لایه جلوی این ساختارها، افزایش چشم‌گیر ۶۲ درصدی در جذب انرژی را نتیجه داده است. از سوی دیگر تمام

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]

ساختارهای با محیط‌واسط آب-هوا بدون هر نوع پارگی در لایه آخر، مقاومت به انفجار زیرآب برتری را به نمایش گذاشته‌اند. آب در محفظه C_1، انتشار یکنواخت بارگذاری موضعی اعمالی و ایجاد درگ روی محصولات انفجاری و تکه‌های L_1 را سبب شده و ترکیب آن با هوای محفظه C_2 منجر به بازتاب بخش عمده موج شاک از روی لایه میانی شده است. همچنین استفاده از لایه میانی St37 در این ساختارها باعث ایجاد یک تغییرشکل گنبدی بدون پارگی در L_2 و کاهش قابل‌توجه ۴۹ درصدی خیز مرکزی در لایه آخر شده است.

- ساختار ۲۰ با $CentD$ برابر با ۱۰/۹ میلی‌متر، کمترین خیز مرکزی لایه آخر، ساختار ۱۸ با $EApM$ معادل با ۱۶۴ژول مترمربع بر کیلوگرم، بیشترین جذب انرژی ویژه سطحی و ساختار ۳۲ با یک ضریب وزنی یکسان برای هر دو شاخص مقاومت به انفجار، مجموعاً رقابتی‌ترین مقادیر را برای $CentD$ حداقلی و $EApM$ حداکثری به‌ترتیب برابر با ۱۱/۶ میلی‌متر و ۸۴/۶ ژول مترمربع بر کیلوگرم نتیجه داده است.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

[1] Wu J, Long Y, Zhou Y, Yu Y, Liu J. Experimental study on the deformation and damage of cylindrical shell-water-cylindrical shell structures subjected to underwater explosion. Thin-Walled Structures. 2018 Jun 1;127:654-65.

[2] Gerdooei M, Rezaei MJ, Ghaforian Nosrati H. Improving the performance of a multi-layer armored system subjected to shock loading of an underwater explosion. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2022 Feb 14;29(3):419-28.

[3] Cole RH. Underwater Explosions.

[4] Keil AH. Introduction to underwater explosion research. UERD, Norfolk Naval Ship Yard, Portsmouth, Virginia. 1956 Dec.

[5] Stiepanow WC, Sipilin PM, Nawagin JS, Pankratow WP. Tłoczenie wybuchowe. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. 1968.

[6] Geers TL, Hunter KS. An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble. The Journal of the Acoustical Society of America. 2002 Apr 1;111(4):1584-601.

[7] Rajendran R, Narasimhan K. Deformation and fracture behaviour of plate specimens subjected to underwater explosion—a review. International Journal of Impact Engineering. 2006 Dec 1;32(12):1945-63.

[8] Ming FR, Zhang AM, Xue YZ, Wang SP. Damage characteristics of ship structures subjected to shockwaves of underwater contact explosions. Ocean Engineering. 2016 May 1;117:359-82.

[9] Kiciński R, Szturomski B. Pressure wave caused by trinitrotoluene (TNT) underwater explosion—short review. Applied Sciences. 2020 May 15;10(10):3433.

[10] Wang G, Zhang S, Yu M, Li H, Kong Y. Investigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries. Applied Ocean Research. 2014 Jun 1;46:40-53.

[11] Galehdari SA, Khodarahmi H, Moud SH, Karimi A. Analysis of Stand Off and Charge Weight Effect on Peak Pressure and Deformation of Metallic Plate Subjected to Under Water Explosion. Advanced Defense Science and Technology. 2014;3:207-16.

[12] Fazli V, Saeed Kiasat M. Investigation of an Stiffened Air-Backed Plate Subjected To Underwater Explosion Loads. National Maritime and Shipping Conference; Chabahar1390.

۱۳- قارنگیان رضا, محمدزاده حسین. مطالعه عددی اندرکنش آب و سازه غوطه‌ور تحت اثر انفجار زیرآب. اولین همایش ملی پدافندغیرعامل در علوم‌دریایی; بندرعباس۱۳۹۳.

[14] Liu GZ, Liu JH, Wang J, Pan JQ, Mao HB. A numerical method for double-plated structure completely filled with liquid subjected to underwater explosion. Marine Structures. 2017 May 1;53:164-80.

[15] Zhang ZF, Ming FR, Zhang AM. Damage characteristics of coated cylindrical shells subjected to underwater contact explosion. Shock and Vibration. 2014;2014(1):763607.

[16] Moradloo J, Valaei H. Dynamic response of submerged steel cylinder subjected to underwater explosion. 7th National Congress on Civil Engineering; Zahedan1392.

[17] Surya Praba RP, Ramajeyathilagam K. Microstructural damage and response of stiffened composite submersible pressure hull subjected to underwater explosion. Ships and Offshore Structures. 2023 Aug 3;18(8):1116-31.

[18] Yuen SC, Nurick GN. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part I: subjected to uniform blast load. International Journal of Impact Engineering. 2005 Jan 1;31(1):55-83.

[19] Langdon GS, Yuen SC, Nurick GN. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part II: localised blast loading. International Journal of Impact Engineering. 2005 Jan 1;31(1):85-111.

[20] Yuen SC, Butler A, Bornstein H, Cholet A. The influence of orientation of blast loading on quadrangular plates. Thin-Walled Structures. 2018 Oct 1;131:827-37.

[21] Yao S, Zhang D, Lu Z, Lin Y, Lu F. Experimental and numerical investigation on the dynamic response of steel chamber under internal blast. Engineering Structures. 2018 Aug 1;168:877-88.

[22] Zhang J, Shi XH, Soares CG. Experimental study on the response of multi-layered protective structure subjected to underwater contact explosions.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]

International journal of impact engineering. 2017 Feb 1;100:23-34.
[23] Lipski A. Change of specimen temperature during the monotonic tensile test and correlation between the yield strength and thermoelasto-plastic limit stress on the example of aluminum alloys. Materials. 2020 Dec 22;14(1):13.
[24] Behtaj M, Babaei H, Mostofi TM. Repeated uniform blast loading on welded mild steel rectangular plates. Thin-Walled Structures. 2022 Sep 1;178:109523.
[25] Meyers MA, Chawla KK. Mechanical behavior of materials. Cambridge university press; 2008 Nov 6.
[26] Mair HU. Hydrocodes for structural response to underwater explosions. Shock and Vibration. 1999 Jan 1;6(2):81-96.
[27] Liu NN, Ming FR, Liu LT, Ren SF. The dynamic behaviors of a bubble in a confined domain. Ocean Engineering. 2017 Nov 1;144:175-90.
[28] Liu NN, Wu WB, Zhang AM, Liu YL. Experimental and numerical investigation on bubble dynamics near a free surface and a circular opening of plate. Physics of Fluids. 2017 Oct 1;29(10).
[29] Autodyn AN. AUTODYN Explicit Software for Nonlinear Dynamics. User's Manual. 2013.
[30] Qi C, Yang S, Yang LJ, Wei ZY, Lu ZH. Blast resistance and multi-objective optimization of aluminum foam-cored sandwich panels. Composite Structures. 2013 Nov 1;105:45-57.
[31] Johnson GR. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. InProceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, Netherlands, 1983 1983.
[32] Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering fracture mechanics. 1985 Jan 1;21(1):31-48.
[33] Buyuk M, Kan S, Loikkanen MJ. Explicit finite-element analysis of 2024-T3/T351 aluminum material under impact loading for airplane engine containment and fragment shielding. Journal of Aerospace Engineering. 2009 Jul;22(3):287-95.
[34] Karim MR, Fatt MS. Impact of the boeing 767 aircraft into the world trade center. Journal of Engineering Mechanics. 2005 Oct;131(10):1066-72.
[35] Li G, Chen XW. Selection and analysis of material models in copper jet penetration into water. InJournal of Physics: Conference Series 2020 Mar 1 (Vol. 1507, No. 3, p. 032017). IOP Publishing.
[36] Li K, Dong X, Li X, Wang Y, Wang W. Determination of JWL parameters from underwater explosion test of spherical explosives by continuous velocity probe. Journal of Energetic Materials. 2021 Oct 2;39(4):479-93.
[37] Jha N, Kumar BS. Air blast validation using ANSYS/AUTODYN. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2014 Jan;3:1.
[38] Rogers GF, Mayhew YR. Thermodynamic and transport properties of fluids. John Wiley & Sons; 1995 Jan 9.
[39] Lee EL, Tarver CM. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives. The Physics of Fluids. 1980 Dec 1;23(12):2362-72.
[40] Dobratz BM, Crawford PC. LLNL explosives handbook. Properties of Explosives and Explosive Simulants, UCRL. 1985 Jan 31;52297:6-.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-26]